

## ECAG-2011 期间 FG5/232 绝对重力仪 观测及结果分析\*

玄松柏<sup>1,2)</sup> 申重阳<sup>1,2)</sup> 谈洪波<sup>1,2)</sup> O. Francis<sup>3)</sup> 李正媛<sup>4)</sup>

- (1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071  
(2) 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地, 武汉 430071  
(3) 卢森堡大学, 卢森堡 L-1351  
(4) 中国地震台网中心, 北京 100045

**摘要** 介绍 2011 年卢森堡 Walldange 第三次欧洲绝对重力比对( ECAG-2011) 期间 FG5/232 绝对重力仪的观测情况。比对结果表明 FG5/232 绝对重力仪观测标准偏差优于  $2.5 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ , 与其他仪器具有较好的一致性。

**关键词** FG5/232 绝对重力仪; ECAG-2011; 重力基准; 标准; 偏差

**中图分类号**: P315.72<sup>+6</sup>

**文献标识码**: A

### MEASUREMENTS AND RESULTS ANALYSIS OF FG5/232 ABSOLUTE GRAVIMETER IN ECAG-2011

Xuan Songbai<sup>1,2)</sup>, Shen Chongyang<sup>1,2)</sup>, Tan Hongbo<sup>1,2)</sup>, O. Francis<sup>3)</sup> and Li Zhengyuan<sup>4)</sup>

- (1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071  
(2) Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071  
(3) University of Luxembourg, Luxembourg L-1359  
(4) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045

**Abstract** The measurements of FG5/232 absolute gravimeter in the course of the third European Comparison of Absolute Gravimeters in Walldange, Luxembourg ( ECAG-2011) are reported. The results showed that the standard deviation of the FG5/232's results is less than  $2.5 \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ , and it is consistent with others.

**Key words**: FG5/232 absolute gravimeter; ECAG-2011; gravity datum; standard; deviation

## 1 引言

绝对重力测量除为相对重力测量建立基准外, 现已被广泛应用于地震等灾害监测、地壳垂直运动、海平面变化和水储量变化及地下水监测等相关研究<sup>[1-6]</sup>, 为大地测量、地球动力学、环境和灾害监测等提供重要依据。为了对绝对重力仪的观测精度进

行评价, 获得绝对重力仪性能, 不同仪器之间需进行比对。

中国地震局地震研究所于 2006 年 9 月从美国 Micro-g LaCoste 公司引进了 FG5/232 绝对重力仪, 目前承担着“大华北强震强化跟踪监测”<sup>[7]</sup>、“中国大陆构造环境监测网络”(陆态网络)、“中国综合地球物理场观测-青藏高原东缘地区”(青藏网络)等

\* 收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 中国地震局地震研究所所长基金( IS201126102)

作者简介: 玄松柏, 男, 1980 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事重力场与重力反演研究. E-mail: song\_bai\_wuhu@163.com

项目中的绝对重力测量工作。为检测 FG5/232 绝对重力仪观测性能,曾多次与国内同类型绝对重力仪进行比对<sup>[8,9]</sup>,2007 年 11 月参加了在卢森堡 Walfdange 地球动力学地下实验室(WULG)举办的第二次欧洲绝对重力比对(ECAG-2007)<sup>[10,11]</sup>,2011 年 11 月参加了该活动的第三次比对(ECAG-2011)。本文将介绍 FG5/232 绝对重力仪在 ECAG-2011 期间的观测情况,并对观测结果进行分析。

## 2 WULG 及 FG5/232 绝对重力测量概况

WULG 建成于 1999 年,位于地下 100 m 深,距矿洞口超过 300 m 的独立硐室内,其空间可容纳 15

台绝对重力仪同时进行测量,环境稳定,一年四季温度和湿度恒定,与外界干扰源隔离,其隔壁房间(小于 20 m)运行有超导重力仪 OSG-CT040,为比对提供精确的潮汐改正,是进行绝对重力比对的理想场地。

卢森堡大学与瑞士计量认证研究所(METAS)联合组织了 ECAG-2011,来自 16 个国家的 22 台绝对重力仪参加了比对。按照比对的技术协议要求,利用 FG5/232 绝对重力仪于 2011 年 11 月 9—11 日期间测量了三个平台上的 A4、B2 和 C3 三个测点,分别进行 15 组,13 组和 24 组测量,采样设置为每半小时 1 组,每组 100 次下落。图 1 为 FG5/232 绝对重力仪在每个点位的观测实况。

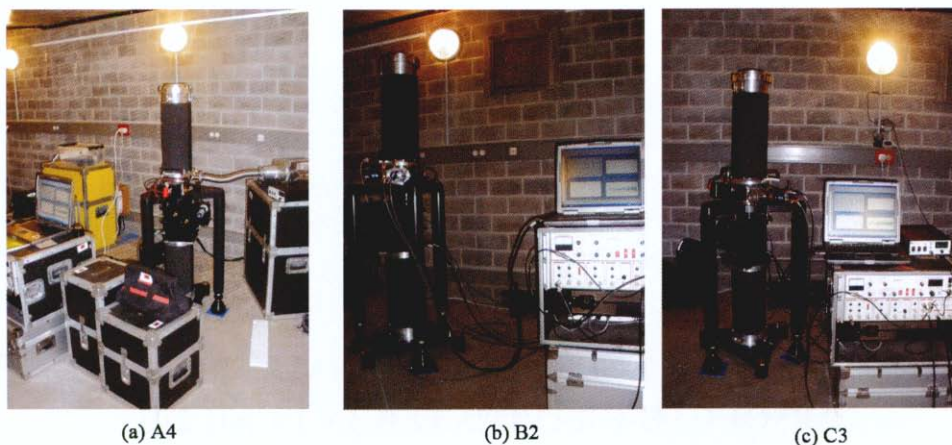


图 1 FG5/232 绝对重力仪在 WULG 测点的测量情况

Fig. 1 Measurement of FG5/232 absolute gravimeter at the stations of WULG

## 3 数据处理与结果分析

### 3.1 数据处理

在每次落体过程中,仪器采集时间和下落距离( $t_i, x_i$ ),根据最小二乘拟合式(1)以确定绝对重力值 $g$ <sup>[12]</sup>:

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma v_0 \tilde{t}_i^3}{6} + \frac{\gamma g_0 \tilde{t}_i^4}{24} \quad (1)$$

式中, $\tilde{t}_i$ 为延迟时间,

$$\tilde{t}_i = t_0 + \frac{x_i - x_0}{c} \quad (2)$$

数据处理过程中需对测量的绝对重力值进行大气压、极移、固体潮、海潮和仪器高度等改正,若需获取地面重力值,则需进一步进行重力垂直梯度校正。FG5/232 绝对重力仪的铷钟频率及气压结果仍按出厂校准因子进行原始数据处理;潮汐改正分别利用超导重力仪 OSG-CT040 观测的潮汐参数和绝对重力数据处理软件 g6 提供的 ETGTAB 潮汐模型进行改正;重力垂直梯度采用 ECAG-2003<sup>[12]</sup>和 ECAG-

2007<sup>[11]</sup>测量结果。另外,还根据厂商提供的仪器参数进行了自身引力和激光条纹校正。详细计算见文献[13,14]。

### 3.2 结果分析

对于绝对重力测量来说,影响其结果精度较为显著的因素除了仪器的操作,还包括潮汐改正模型和重力垂直梯度的精度。

ECAG-2011 前后,利用 FG5/232 绝对重力仪在中国地震局地震研究所的国家重力基准点#3053 分别进行了一次测量,两次测量间隔一个半月左右,结果相差  $0.7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ,表明 FG5/232 绝对重力仪单点复测稳定性较好。

表 1 为 FG5/232 绝对重力仪在 ECAG-2011 期间数据处理结果,其中潮汐改正分别按照 Micro-g 提供的绝对重力数据处理软件 g6 中的 ETGTAB 潮汐模型,及 OSG-CT040 超导重力仪连续观测获得的潮汐参数进行改正。表 1 中可以看出,利用 ETGTAB 潮汐模型改正 3 个点的标准偏差均优于  $\pm 2.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ,说明 FG5/232 绝对重力仪单点次测量

具有较高的精度。而利用 OSG-CT040 超导重力仪连续观测获得的潮汐参数改正 3 个点的标准偏差均优于  $\pm 2.5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 略大于 ETGTAB 潮汐模型改正结果, 体现了 ETGTAB 潮汐模型与 OSG-CT040 超导重力仪结果之间的差异, 两种潮汐改正对观测重力值影响相对偏差为  $-(0.3 \sim 0.1) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

重力垂直梯度改正对绝对重力观测结果影响显著, 重力垂直梯度相差 1%, 重力值归算结果则相差

$1.3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 为了减少重力垂直梯度改正的影响, 本文中仅将其列于表 1 中, 采用 1.3 m 的绝对重力值而不进行改正。

特别需要说明的是, 在进行 WULG-A4 点测量时, 因比对时间的要求, FG5/232 绝对重力仪测量是在抽真空状态下进行, 表 1 显示 WULG-A4 点测量标准差较小, 满足绝对测量与比对技术协议要求。

表 1 FG5/232 绝对重力仪数据处理结果(参考重力值:  $980\,960\,000.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

Tab.1 Results of FG5/232 absolute gravimeter (The reference value  $980\,960\,000.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

点号	测量时间 (年-月-日)	测量 组数	垂直梯度 ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2} / \text{cm}$ )	标准差 ( $\pm 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )		1.3 m 重力值 ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )		互差 ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )
				ETG	OSG	ETG	OSG	
WULG-A4	2011-11-09—10	15	-2.677	0.9	2.1	4 199.0	4 199.3	-0.3
WULG-B2	2011-11-10	13	-2.776	1.5	2.2	4 073.5	4 073.8	-0.3
WULG-C3	2011-11-10—11	24	-2.719	0.8	2.4	3 950.2	3 950.3	-0.1

注: ETG 表示利用 ETGTAB 进行潮汐改正; OSG 表示利用 OSG-CT040 观测结果进行潮汐改正

### 3.3 与 ECAG-2007 对比

表 2 为 FG5/232 绝对重力仪测量数据处理结果与 ECAG-2007 中 O. Francis 教授和 A. Germak 教授处理的比对结果<sup>[11]</sup>对比, WULG-A4 点分别相差  $+6.7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  和  $+5.9 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , WULG-B2 点分别相差  $+3.2 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  和  $+6.6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , WULG-C3 点分别相差  $+1.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  和  $+0.8 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。根据比对期间 OSG-CT040 超导重力仪监测的 WULG 重力变化较小( $-1 \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ), 因此, 利用 FG5/232 绝对重力仪一台重力仪的观测结果估算 WULG 自 2007 年 4 年来的重力变化, 即  $+3.6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2} \pm 2.9 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (与 O. Francis 教授处理结果比较) 或  $+4.4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2} \pm 3.1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  (与 A. Germak 教授处理结果比较), 与比对组织者利用所有仪器数据处理结果(该结果

尚未发布)之差在  $\pm 2 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  以内, 说明 FG5/232 与其他仪器具有较好的一致性。

ECAG-2007, O. Francis 教授采用测量同一点的仪器观测结果的均值作为该点的参考重力值, A. Germak 教授采用所有仪器测量在所有点上观测结果的均值作为参考重力值, 因此, 两种结果存在差异( $-1.3 \sim 3.4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )<sup>[11]</sup>。

## 4 结论与讨论

观测结果表明, FG5/232 绝对重力仪单次测量精度较高, 点位复测偏差较小, 与其他仪器具有较好的一致性, 观测结果具有较高的可信度。

FG5/232 绝对重力仪观测结果与 ECAG-2007 结果对比, 所测量 3 点重力变化趋势相同, 为  $(1.0 \sim 6.7) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 是 3 个点本身重力变化不同, 还是仪器的观测精度引起, 待比对结果公布后另文讨论。

超导重力仪主要作用: 一是计算潮汐参数, 为更精确的潮汐改正提供高精度潮汐模型; 二是监测点位的重力时间变化, 进一步成为衔接不同重力仪、不同时间在同一点位的观测结果比较的纽带, 也可为同一台仪器短期内在同一点位观测结果的差异提供参考。

重力垂直梯度改正的影响亦不可忽视, 以高度相差 1 m 重力变化  $308 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  计算, 归算精度在  $\pm 1 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  内时重力垂直梯度精度应优于  $4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 因此, 进行绝对重力测量的同时需测量重力垂直梯度。

表 2 FG5/232 观测结果与 ECAG-2007 结果对比(单位:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

Tab.2 Comparison between the results of FG5/232 and ECAG-2007 (unit:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

	ECAG-2007		ECAG-2011		偏差
	Francis 结果	O. Germak 结果	FG5/232 结果	Francis 结果	O. Germak 结果
WULG-A4	4 192.6	4 193.4	4 199.3	+6.7	+5.9
WULG-B2	4 070.6	4 067.2	4 073.8	+3.2	+6.6
WULG-C3	3 949.3	3 949.5	3 950.3	+1.0	+0.8
均值				+3.6	+4.4
标准差				2.9	3.1

## 参 考 文 献

- 1 Shigeo Yoshida, et al. Absolute gravity change associated with the March 1997 earthquake swarm in the Izu Peninsula, Japan [J]. *Earth Planets Space*, 1999, 51:3 – 12.
- 2 王勇,等. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(1): 95 – 100. (Wang Yong, et al. Gravity change detected by repeated absolute gravity measurements in the western Yunnan and Lhasa China and implication [J]. *Chinese J Geophys*, 2004, 47(1): 95 – 100)
- 3 Francis O, et al. Indication of the uplift of Ardenne in long-term gravity variations in Membach (Belgium) [J]. *Geophys J Int.*, 2004, 158: 346 – 352.
- 4 Teferle F N, et al. Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea-level at tide-gauges in the UK [J]. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2006, 364: 917 – 930.
- 5 Thomas Jacob, et al. Absolute gravity monitoring of water storage variation in karst aquifer on the Larzac plateau (Southern France) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 359(1 – 2): 105 – 117. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.06.020.
- 6 岳建利,等. 利用绝对重力测量对大地原点地下水沉降的研究 [J]. *测绘科学*, 2010, 35(2): 18 – 20. (Yue Jianli, et al. Study of groundwater settlement by absolute gravity measurement [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2): 18 – 20)
- 7 Hao H T, et al. Temporal variation of gravity-field in North China before and after the 2011 Japan MW9.0 earthquake [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2011, 2(4): 10 – 15.
- 8 Xing L L, et al. Comparison of absolute gravity measurements obtained with FG5/232 and FG5/214 instruments [J]. *Geo-spatial information Science*, 2009, 12(4): 307 – 310.
- 9 肖凡,等. FG5 绝对重力仪 232/240 比对观测结果分析 [J]. *测绘信息工程*, 2011, 36(2): 40 – 42. (Xiao Fan, et al. Analysis of comparison results of FG5 absolute gravimeters 232/240 [J]. *Journal of Geomatics*, 2011, 36(2): 40 – 42.)
- 10 邢乐林,等. 欧洲 Walferdange 绝对重力仪比对观测 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(3): 77 – 79. (Xing Lelin, et al. Comparative observation of absolute gravimeters in Walferdange [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(3): 77 – 79)
- 11 Francis O, et al. Results of the European Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange November 2007 [J]. *Gravity, geoid and earth observation: IAGS*, 2010, 135: 31 – 35.
- 12 Francis O, et al. Results of the international comparison of absolute gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003 [J]. *Gravity, geoid and earth observation: IAGS*, 2006, 129(7): 272 – 275.
- 13 Micro-g LaCoste. FG5 Absolute Gravimeter User's Manual [M]. Colorado, USA, 2008.
- 14 邢乐林,等. FG5 绝对重力仪及测点 3053 的绝对重力测量 [J]. *测绘信息与工程*, 2007, 32(2): 27 – 29. (Xing Lelin, et al. FG5 absolute gravimeter and its survey at 3053 station [J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(2): 27 – 29)